

陈百炼, 胡欣欣, 吴息, 等. 基于过程判别的雨雾凇导线覆冰气象模式. 应用气象学报, 2018, 29(3): 354-363.

DOI: 10.11898/1001-7313.20180309

基于过程判别的雨雾凇导线覆冰气象模式

陈百炼^{1)*} 胡欣欣¹⁾ 吴 息²⁾ 程志刚³⁾

¹⁾ (贵州省山地环境气候研究所, 贵阳 550002)

²⁾ (南京信息工程大学, 南京 210044)

³⁾ (成都信息工程大学, 成都 610225)

摘 要

利用 2011 年 1 月—2013 年 3 月在贵州开展导线覆冰自动观测试验获取的观测资料, 分析了覆冰过程演变及其气象条件变化特征, 提出一次完整的导线覆冰过程包括覆冰开始、增长、维持、减弱、消融 5 个阶段, 并得到覆冰过程的气象条件判别指标; 基于导线覆冰理论模型的改进并结合气象条件判别, 建立了基于过程判别的雨雾凇导线覆冰气象模式, 应用该模式对观测获取的多个导线覆冰过程进行数值模拟检验。结果表明: 模式能够模拟自然环境下覆冰的增长, 并能够正确模拟出覆冰的减弱、消融, 模拟过程覆冰质量变化的最大相对误差小于 20%。该模式具有较完整的理论基础和计算方案, 主要以常规气象观测要素为输入, 能够计算输出覆冰全过程逐小时覆冰质量、覆冰厚度及覆冰密度变化, 具有较大的应用前景。

关键词: 导线覆冰; 过程判别; 气象模式; 数值模拟

引 言

2008 年初发生在我国南方地区的持续低温雨雪冰冻灾害导致了极其严重的冰灾, 南方电网大面积损毁、多地电力供应中断, 直接经济损失达上千亿元。2008 年以来, 国内针对该次历史罕见的冰冻灾害从气候学、天气学、灾害学等方面进行了大量研究, 针对导线覆冰及其机理的研究却鲜见报道。导线覆冰机理复杂, 涉及到大气物理学、气象学、流体力学、热力学等多学科交叉领域。自 1982 年第 1 次国际结构物大气积冰研讨会(IWAIS)以来, 描述覆冰机理的动力学和热力学模型有了很大发展。如 Lozowski 等^[1]建立了描述固定圆柱导线覆冰的二维理论模型, Makkonen^[2]建立了圆柱导线均匀覆冰理论模型并进行了数值模拟研究, Jones^[3]提出简化的雨凇覆冰模型得到广泛应用。我国学者谭冠日^[4]较早提出了分析导线覆冰应遵循的理论公式, 蒋兴

良等^[5]分析了三峡地区导线覆冰的特性并提出了雾凇覆冰的理论模型, 刘和云等^[6]在借鉴国外覆冰模型的基础上提出了一个雨凇覆冰的简单模型, 孙才新等^[7]通过导线表面热平衡方程分析了覆冰干湿增长转变的临界条件, 林锐等^[8]从流体力学和热力学原理出发建立了基于碰撞特性的雾凇覆冰模型并进行了仿真计算, 刘春城等^[9]分析了输电线路覆冰机理并提出了雨凇覆冰的预测模型。这些研究主要以理论模型分析和试验室数据仿真为主, 由于覆冰理论模型参数众多、计算复杂, 加之缺乏覆冰过程详细观测数据, 导致对自然条件下导线覆冰过程的数值模拟较为困难。国内近年也开展了这方面的一些尝试, 如牛生杰等^[10]利用在湖北恩施雷达站观测的电线积冰及相关气象数据, 应用理论模型对导线覆冰厚度进行了数值模拟试验; 吴息等^[11]采用常规气象资料拟合理论模型参数方法对电线积冰观测资料进行模拟; 邓芳萍等^[12]综合考虑雨雾凇积冰增长以及热力融冰和升华脱冰影响, 建立了基于常规气象资

2017-11-20 收到, 2018-02-27 收到再改稿。

资助项目: 国家公益性行业(气象)科研专项(GYHY201006033)

* 邮箱: cbcb99@163.com

料的标准冰厚计算模型。另外还有一些学者基于统计方法分析了各地电线积冰的特征并建立了相应的冰厚估算模型^[13-15]。但以上研究采用的覆冰资料均为人工观测获取,人工观测误差较大且难以获得覆冰过程变化的详细观测资料,给实际覆冰过程的模拟研究带来了困难。在公益性行业科研专项支持下,贵州省山地环境气候研究所与中国科学院电工研究所合作,研制成功了适用于野外观测试验的导线覆冰重量自动观测设备,利用该设备配合自动气象站、激光雨滴谱于2011年1月起在贵州重冰区连续开展导线覆冰自动观测试验,获取了大量导线覆冰过程演变的详细资料。本文利用2011年1月—2013年3月在贵州开展自动观测试验获取的观测资料,在对导线覆冰演变过程及其气象条件深入分析的基础上,基于导线覆冰理论模型的改进并结合气象条件判别指标建立了雨雾凇导线覆冰气象模式,利用观测资料对模式的应用效果进行了验证。

1 雨雾凇导线覆冰过程及其气象条件

导线覆冰也称为电线积冰,电线积冰是我国气象站人工观测项目。按照地面气象观测规范^[16],在冬季出现覆冰的情况下需对电线积冰直径进行每日至少两次的定时观测,仅当直径超过规定值才测量积冰质量。由于气象站的电线积冰观测时次少、资料连续性差,缺乏覆冰过程变化的详细信息,难以应用于覆冰过程的研究。针对导线覆冰自动观测的难题,中国科学院电工研究所于2010年初研制成功了基于气象观测规范的导线覆冰重量自动监测系统^[17]。在公益性行业科研专项支持下,项目组将该自动监测设备加以改进,使之适用于野外导线覆冰重量的自动监测。2011年1月—2013年3月项目

组利用该套设备并配合自动气象站、激光雨滴谱仪等,在贵州重冰区威宁、开阳等地开展了导线覆冰野外自动观测试验,获得了大量导线覆冰过程详细观测资料,包括覆冰过程期间每分钟覆冰质量及相关气象要素的变化。观测到的覆冰过程包括雨凇、雾凇及雨雾混合凇覆冰过程,其中持续20 h以上的覆冰过程43次,最大覆冰质量为 $2760 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$,最长持续时间为260 h。关于该自动观测试验的详细介绍以及观测资料分析见文献^[18]。

以往由于缺乏导线覆冰过程详细观测资料,对覆冰过程演变特征的研究很少。邓芳萍等^[12]认为导线覆冰过程包括覆冰增长、维持和脱落3个阶段,牛生杰等^[10]认为覆冰过程包括准备期、增长期、维持期及脱离期4个阶段。本文通过在贵州开展导线覆冰自动观测试验获取的大量观测资料统计分析,结果表明:一次完整的导线覆冰过程应包括覆冰开始、增长、维持、减弱、消融5个阶段。

图1为2011年1月5日22:00—1月7日16:00(北京时,下同)威宁站($26^{\circ}52' \text{N}$, $104^{\circ}17' \text{E}$, 海拔为2237 m)观测到的一次覆冰过程中覆冰质量随时间的演变情况。图1根据覆冰质量变化曲线可以划分为覆冰开始、增长、维持、减弱、消融5个阶段,而覆冰增长和减弱阶段在其中重复出现。对观测获取的43次持续20 h以上的覆冰过程统计结果表明:一般覆冰过程中环境气温均维持在 0°C 以下,在持续时间较长的覆冰过程中,覆冰增长、维持、减弱阶段会随气象条件的变化而交替出现。覆冰的开始阶段一般较为缓慢,当环境气温在 0°C 附近波动时覆冰并不明显,当环境气温稳定降至 0°C 以下并出现雾或降雨则覆冰开始快速增长;随着雨雾的消散覆冰进入维持阶段,覆冰质量变化不大;在空气湿度降低且未出现雾和降雨条件下覆冰表面因挥发或

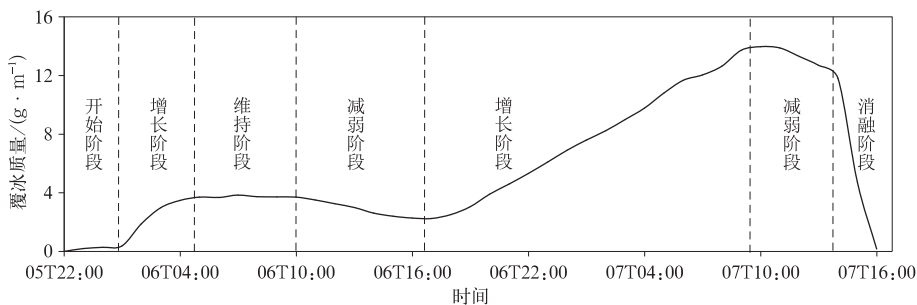


图1 2011年1月5—7日威宁站导线覆冰过程不同演变阶段示意图

Fig. 1 Different phases of a wire icing process at Weining
from 5 Jan to 7 Jan in 2011

蒸发会导致质量减轻,因此,覆冰过程存在一个减弱的阶段。相对覆冰的开始和增长来说,覆冰的消融十分迅速,只要环境气温稳定上升到 0°C 以上,不管其他气象条件如何覆冰大多在数小时内消融,覆冰过程结束。由于影响覆冰变化的气象因子十分复杂,试图通过统计方法建立覆冰的预测模型十分困难,即使建立这样的模型实用效果也不理想。因此,覆冰的气象模型必须建立在完整的覆冰机理基础上,并结合气象条件指标进行判断。

在导线本身不发热的情况下,环境气温维持在 0°C 及以下处于覆冰过程的判别指标。观测分析还发现,环境气温升至 0°C 以上后需要稳定一段时间方可使积累的覆冰全部消融,即覆冰过程从消融到结束需要有一个响应时间。经对大量覆冰过程观测数据的统计分析,该响应时间约为 $3\sim 6\text{ h}$ 。因此,可以将环境气温上升到 0°C 以上并稳定 3 h 以上

作为覆冰过程结束的判别指标。本文通过对 2011 年 1 月—2013 年 3 月 43 次持续 20 h 以上覆冰过程的统计分析,得到覆冰过程各阶段的气象条件判别指标(表 1)。

表 1 是一套综合的气象条件判别指标,包括温度、湿度及其变化趋势的判断以及降雨或雾是否出现的条件组合,可以用于对覆冰过程不同阶段进行判别。其中温度、湿度是导线覆冰出现的基本条件,在满足温度、湿度条件情况下降雨或雾的出现是覆冰增长的必要条件。在覆冰开始和增长阶段必须有降雨或雾两者之一出现,在维持阶段无降雨但可以无轻雾出现,而在减弱阶段即无降雨也无雾出现。由于观测到的导线覆冰性质主要是雨淞、雾淞及其混合冻结,以上气象条件判别指标主要针对雨雾淞覆冰过程进行判别。

表 1 导线覆冰过程不同阶段的气象条件判别指标

Table 1 Meteorological conditions for different phases of icing process

阶段	温度	温度变化	湿度	湿度变化	降雨	雾
开始	不高于 0°C	下降	大于 90%	稳定	有/无	无/有
增长	不高于 0°C	下降/维持	大于 95%	稳定	有/无	无/有
维持	不高于 0°C	维持/上升	约 90%	稳定	无	有/无
减弱	不高于 0°C	上升	小于 85%	维持/下降	无	无
消融	高于 0°C	上升	小于 80%	下降	有/无	无

2 雨雾淞导线覆冰气象模式

2.1 理论模型及参数化方法

根据国内外相关研究^[19-20],雨雾淞导线覆冰质量增长理论模型为

$$\frac{dM}{dt} = EnDWV. \quad (1)$$

式(1)中, E 为空气中液滴相对导线表面的碰撞率, n 为液滴在导线表面的冻结率, D 为导线直径, W 为空气中液态水含量, V 为垂直于导线方向的风速。气流中液滴相对圆柱体运动的轨迹与空气粘性、液滴大小、气流速度以及圆柱尺寸等有关,理论上碰撞率需通过求解液滴相对圆柱体运动的轨迹方程得到。由于碰撞率理论计算十分复杂,Finstad 等^[21]通过对试验资料的拟合,提出了计算碰撞率的简化公式:

$$E = A - 0.028 - C(B - 0.045), \quad (2)$$

其中,

$$\begin{aligned} A &= 1.066K^{0.00616}e^{-1.103K^{0.688}}, \\ B &= 3.641K^{0.498}e^{-1.497K^{0.694}}, \\ C &= 0.00637(\phi - 100)^{0.381}. \end{aligned}$$

K 和 ϕ 量纲为 1, ($K = \rho_w d^2 v / 9\mu D$, $\phi = R_e^2 / K$), D 为导线直径, d 为液滴直径, R_e 为液滴运动的雷诺数($\rho_a dv / \mu$), ρ_w 和 ρ_a 分别为液滴和空气的密度, v 为气流运动速度, μ 为空气的绝对粘度。Finstad 等^[22]通过风洞试验指出,利用液滴中值体积直径可以求得空气中液滴对导线的总体碰撞率,而不必分别求取液滴滴谱上每一直径粒子的碰撞率。由于导线覆冰后直径增大,因此,实际应用式(2)时导线直径 D 是变化的。雾淞覆冰情况下碰撞率将随导线覆冰后直径增大而迅速下降,这是因为导线直径增大后将使气流受扰动影响程度增加,而雾滴的直径很小,更多的雾滴将随气流绕过导线而使碰撞率降低;而雨滴的直径很大,根据式(2)的计算结果其碰撞率已接近 1,且导线直径增大对其影响并不明显,因此,雾

凇覆冰与雨凇覆冰的碰撞率有很大差异。

冻结率表示碰撞到导线表面的过冷水滴在导线上的冻结效率,由导线表面热平衡状态决定。如果导线捕获的水滴在其表面瞬间完全冻结称为干增长,此时冻结率为1;如果捕获的水滴仅部分冻结,在覆冰形成的同时仍有少量液态水存在则称为湿增长,此时冻结率小于1。冻结率需通过求解导线覆冰表面热平衡方程得到。导线覆冰过程中的表面热平衡方程^[2]可表示为

$$Q_f + Q_v + Q_k + Q_a = Q_c + Q_e + Q_i + Q_s + Q_l. \quad (3)$$

在式(3)等号左边的热源项中, Q_f 为水滴冻结释放的潜热, Q_v 为气流与冰面摩擦产生的热量, Q_k 为液滴撞击动能转化产生的热量, Q_a 为液滴从冻结温度降温到表面温度放出的热量。在该式等号右边的热汇项中, Q_c 为气流带走的表面感热, Q_e 为覆冰表面挥发或蒸发损失的热量, Q_i 为过冷水升温到冰点消耗的热量, Q_s 为长波辐射损失的热量, Q_l 为覆冰表面向内部传输的热量。设 F 为空气中液态水质量通量,在干增长时 $Q_f = EFL_f$,其中, E 为碰撞率, L_f 为水的冻结潜热;在湿增长时有少部分未及时冻结的液态水被包裹到冻结而成的冰晶体结构中,形成所谓海绵冰^[23],这时 $Q_f = (1-\lambda)nEFL_f$,其中, n 为冻结率,一般 λ 取0.3; $Q_v = hrv^2/(2c_p)$,其中, h 为对流热传输系数, r 为局部恢复系数(0.79), v 为气流运动速度, c_p 为干空气的定压比热;在自然气象条件下, Q_k 可忽略不计;而 $Q_a = Fc_i(0^\circ\text{C} - t_s)$,其中, c_i 为冰的比热, t_s 为覆冰表面温度; $Q_c = h(t_s - t_a)$, t_s 和 t_a 分别为冰面温度和环境气温; $Q_e = h\epsilon L_e \times (e_{is} - e_a)/(c_p p_a)$,其中 $\epsilon = 0.622$, L_e 是水的蒸发或挥发潜热, e_{is} 和 e_a 分别是冰面饱和水汽压和环境空气水汽压, p_a 为环境大气压; $Q_i = Fc_w \times (0^\circ\text{C} - t_a)$,其中 c_w 为水的比热; $Q_s = a\sigma(t_s - t_a)$, σ 为 Stefan-Boltzmann 常数($5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$), $a = 8.1 \times 10^7 \text{ K}^3$ 。在导线本身发热很小的情况下 Q_l 可忽略不计。在湿增长状态下,根据覆冰表面能量平衡方程,可以导出其冻结率为

$$n = \frac{1}{F(1-\lambda)L_f} [- (h + \alpha a)t_a + \frac{h\epsilon L_e}{c_p p_a} (e_0 - e_a) - \frac{hrv^2}{2c_p} - Fc_w t_a]. \quad (4)$$

其中,对流热交换系数 $h = kN_u/D$, k 为空气导热系数, N_u 为气流相对圆柱运动的努塞数。这里采用

Makkonnen 的参数化方案^[2] $N_u = 0.032R_e^{0.85}$,其中, R_e 为导线圆柱雷诺数($\rho_a DV/\mu$)。

2.2 雨雾凇覆冰处理

对于雾凇覆冰过程,由于雾滴很小飘浮在空中,造成导线覆冰主要是水平方向风的作用。空气中的液态水质量通量可写为 $F = WV$,其中, W 为雾中液态水含量, V 为垂直于导线方向的风速。对于雨凇覆冰过程,其垂直方向下落的雨滴对导线覆冰的贡献不能忽略^[3],需要同时考虑来自水平方向和垂直方向的过冷雨滴对导线覆冰的贡献。设空气中降雨产生的液态含水量为 W_1 ,雨滴垂直下落速度为 V_1 ,则其导致的垂直方向上液态水质量通量为 $F_1 = W_1 V_1$ (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。根据量纲分析可将垂直下落的液态水质量通量与降水强度 P (单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)的关系写为

$$F_1 = W_1 V_1 = 0.001\rho_w P/3600. \quad (5)$$

式(5)中, ρ_w 为水的密度(单位: $10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。同时在水平方向上由于风的作用输送的液态水质量通量为 $F_2 = WV$,其中 V 为与导线垂直的水平风速。将两个方向上的液态水质量通量作矢量合成,可以得到降雨情况下导线捕获的总液态水质量通量为 $F = E\sqrt{F_1^2 + F_2^2}$, E 为碰撞率。

由导线覆冰质量增长理论模型公式可见,在模型系数 E , n 已确定情况下,一定粗细导线上的覆冰增长量取决于空气中液态含水量 W 和风速 V 。大气液态含水量包括雾中含水量和降雨造成的含水量,均不是常规气象观测要素。对于降雨造成的大气含水量,可采用 Best^[24]的经验公式: $W = 0.067P^{0.846}$ (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),其中 P 为降水强度。由于本次试验未开展雾的观测,雾中液态含水量需通过相关气象要素推算。常规气象观测中能见度是与雾中液态含水量关系最直接的气象指标,吴息等^[25]曾利用雾中能见度估算雾中液态含水量,但由于能见度的观测误差很大使其效果并不理想。考虑到雾中液态含水量与环境空气水汽含量有一定关系:空气水汽含量越大,水汽在凝结核上凝结越多,雾中液态含水量越大,反之液态含水量越少。作为一种近似,可以用空气中水汽含量估算雾中液态含水量。根据大气热力学原理,湿空气中总的水汽含量即绝对湿度,假设雾中液态含水量与饱和空气绝对湿度有近似正比关系,由此可以将其写为 $W = ke_s/(RT_a)$;其中, k 为比例系数, e_s 为湿空气饱和水汽压, R_v 为水汽比气体常数, T_a 为热力学温度。由

于湿空气中水汽含量随环境气温降低而减小,雾中含水量也应随环境气温降低而减小,参考江祖凡^[26]对庐山云雾含水量的观测研究结果,本文采用的雾中液态含水量的计算方案为

$$W = 216.68k \frac{e_s}{(t_a + 273.15)} e^{0.063t_a} \quad (6)$$

式(6)中, W 的单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, t_a 为环境气温(单位: $^{\circ}\text{C}$), e_s 的单位: hPa。利用以往在贵州开展冬季云雾观测试验得到的 20 组 0°C 以下不同温度对应的雾中液态含水量资料^[27], 对该方案的应用效果进行了检验。图 2 给出了当 k 取 0.067 时所得计算结果与观测的比较。

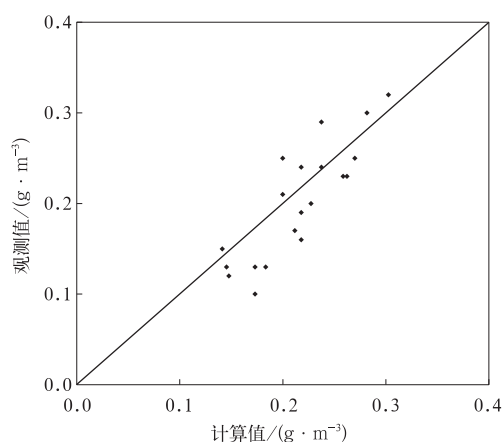


图 2 雾中液态含水量计算结果与观测对比

Fig. 2 Comparison between calculation and observation of liquid water content in freezing fog

图 2 中计算结果与观测相关系数超过 0.85, 达到 0.01 显著性水平, 平均误差约为 $0.02 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。可见该方案的应用效果比较好。根据以往对贵州冬季云雾的观测试验^[28], 过冷雾滴的平均中值体积直径约为 $20 \mu\text{m}$, 平均雾中液态含水量约为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 与该方案的计算结果较接近。需要指出的是, 环境空气湿度达到饱和是雾生成的基本条件, 但并不是空气湿度达到饱和就一定有雾出现。本文对覆冰过程的观测分析表明, 相对湿度达到 95% 以上且环境气温处于下降或维持过程中大多有雾出现, 可以作为是否计算雾中液态含水量的一个判据。由于覆冰的增长对雾中含水量非常敏感, 在进行雾中液态含水量计算时必须加以严格的控制条件。

2.3 模拟方案

根据雨雾淞导线覆冰理论模型, 单位长度导线

上时间 T 内的覆冰质量增量为

$$\Delta M = \int_0^T n(t) E(t) F(t) D(t) dt \quad (7)$$

其中, $n(t)$ 和 $E(t)$ 分别为冻结率和捕获率, $F(t)$ 为空气中液态水质量输送通量, $D(t)$ 为包含导线本身直径在内的覆冰直径, 均随时间变化。取式(7)的差分形式计算, 时间步长 $\Delta t = 1 \text{ h}$, 考虑圆柱导线均匀覆冰, 则相应的覆冰厚度增量为

$$\Delta h = \sqrt{\left(\frac{D_{i-1}}{2}\right)^2 + \frac{\Delta M}{\pi \rho_i}} - \frac{D_{i-1}}{2} \quad (8)$$

其中, ρ_i 为覆冰密度, 通过 Macklin 数计算。Macklin 数^[29]定义为 $R = -v_0 d_m / 2t_s$; 其中 v_0 为液滴撞击速度, d_m 为液滴中值体积直径, t_s 为覆冰表面温度。液滴撞击速度计算方法参照 Makkonen^[2], 覆冰密度计算采用 Bain 等^[30]的方案。而覆冰表面温度是反映干、湿增长机制的重要指标, 湿增长时覆冰表面温度 t_s 固定为 0°C , 而干增长时 $t_s < 0^{\circ}\text{C}$, 具体通过数值求解覆冰表面热平衡方程得到。由于实际观测中发现覆冰质量会因挥发或蒸发而出现损失, 因此, 模式中应计算覆冰质量减少量。而已有的覆冰理论模型仅描述覆冰质量的增长, 如何计算覆冰质量的损失是一个关键问题。考虑到覆冰质量的变化是与覆冰表面能量平衡状态相关联的, 本文将两者结合起来, 根据覆冰表面能量平衡方程中的表面潜热通量项, 覆冰表面因挥发或蒸发损失的质量为

$$\Delta m = \epsilon h \frac{(e_{is} - e_a)}{c_p p_a} \pi D \Delta t \quad (9)$$

其中 $\epsilon = 0.622$, h 为导线覆冰表面对流热交换系数, e_{is} 为覆冰表面饱和水汽压, e_a 为环境空气水汽压, c_p , p_a 分别为湿空气比热及环境大气压。

模式中使用的空气密度、比热、导热率、粘性系数等物理参数均为湿空气参数, 参照纪威等^[31]给出的公式计算。观测试验发现覆冰期间出现较大降雨量的冻雨并不多见, 更多的是降雨强度很小的冻毛雨, 雨滴谱观测数据分析结果其雨滴直径范围在 $200 \sim 400 \mu\text{m}$, 平均中值体积直径约为 $360 \mu\text{m}$ 。根据以往观测资料, 本文在雾淞覆冰时取雾滴平均中值体积直径为 $20 \mu\text{m}$, 而在雨淞覆冰时, 根据降水强度大小取雨滴平均中值体积直径为 $200 \sim 400 \mu\text{m}$ 。

2.4 模式运算流程

采用逐小时气象数据输入, 在每一时间步判断是否可能处于覆冰过程, 即环境气温 t_a 是否不高于 0°C , 若满足条件, 则计算导线或覆冰表面温度, 并结

合天气现象观测(是否有雾或降雨)判断覆冰类型(雾凇或雨凇覆冰),计算覆冰密度,并通过模式计算得到覆冰质量、覆冰厚度及导线覆冰后直径的变化,计算结果可以逐时输出。如果在某一时间步出现环

境气温高于 0°C 则判断覆冰过程是否结束(连续3 h以上 $t_a > 0^{\circ}\text{C}$),若覆冰过程结束则将累积的覆冰质量和覆冰厚度清零,下一时刻重新开始对新的覆冰过程进行判断和计算。模式运算流程见图3。

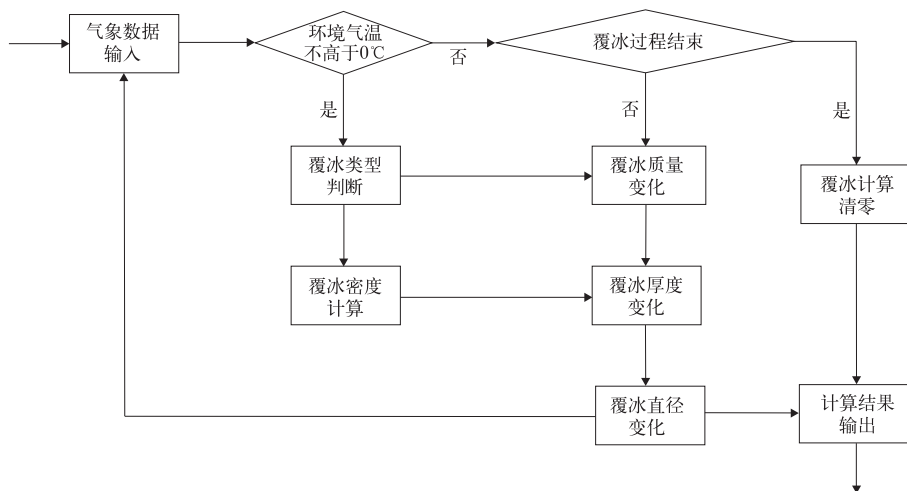


图3 基于过程判别的雨雾凇导线覆冰气象模式运算流程

Fig. 3 The modeling based on judgment of the wire icing process

模式输入主要为逐小时常规地面气象观测要素,包括温度、湿度、风向、风速、气压、降雨量及天气现象,模式输出包括覆冰过程每小时覆冰质量、覆冰厚度及覆冰密度变化的计算结果。循环进行图3中的模式运算流程,可实现对实际观测的导线覆冰演变过程包括覆冰开始、增长、维持、减弱、消融各阶段全过程的连续模拟。

3 模式应用效果检验

3.1 覆冰过程模拟结果

应用以上建立的基于过程判别的导线覆冰气象模式,对观测试验期间获取的多个连续覆冰过程进行数值模拟检验。

图4为2011年1月27日16:00—2月1日16:00在威宁站观测到的连续覆冰过程逐小时变化的模拟结果。该次连续覆冰过程共持续约120 h,是一次典型的雨雾凇混合覆冰过程。由图4a可见,模式模拟的整个覆冰过程逐小时覆冰质量变化与实际观测结果比较接近,模拟结果不仅准确地描述了覆冰的持续增长,而且比较准确地表现了覆冰质量的变化,以及环境气温稳定上升到 0°C 以上覆冰消

融全过程的演变情况,整个过程模拟覆冰质量变化的最大相对误差小于20%。图4b给出了模拟的覆冰厚度与覆冰密度变化,由于目前还无法实现覆冰厚度和密度的自动观测,故未与观测对比,但模拟覆冰厚度变化与覆冰质量变化趋势一致,计算得到的过程最大覆冰厚度为10.8 mm,与人工观测到的11 mm接近;模拟得到平均覆冰密度约为 $0.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,与该次覆冰过程性质为雨雾凇混合冻结一致。

图5为2011年12月21日0:00—12月26日14:00在梅花山野外站($26^{\circ}42'\text{N}$, $104^{\circ}38'\text{E}$,海拔为2500 m)观测到的连续覆冰过程的模拟结果。该次覆冰过程约持续135 h,覆冰性质为雾凇。覆冰开始后缓慢持续增长,约65 h后出现的浓雾使覆冰快速增长,而后浓雾消散使覆冰进入维持减弱阶段,35 h后出现的浓雾又导致覆冰显著增长,覆冰质量增长到最大值 $456 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$,此后温度稳定上升到 0°C 以上,覆冰在3 h内迅速消融,覆冰过程结束。由图5a可见,覆冰质量的模拟结果与观测十分接近,模拟结果较准确地描述了覆冰质量的持续增长。模拟得到的最大覆冰厚度为22.8 mm(图5b),与人工观测到的24 mm接近;模拟得到的平均覆冰密度

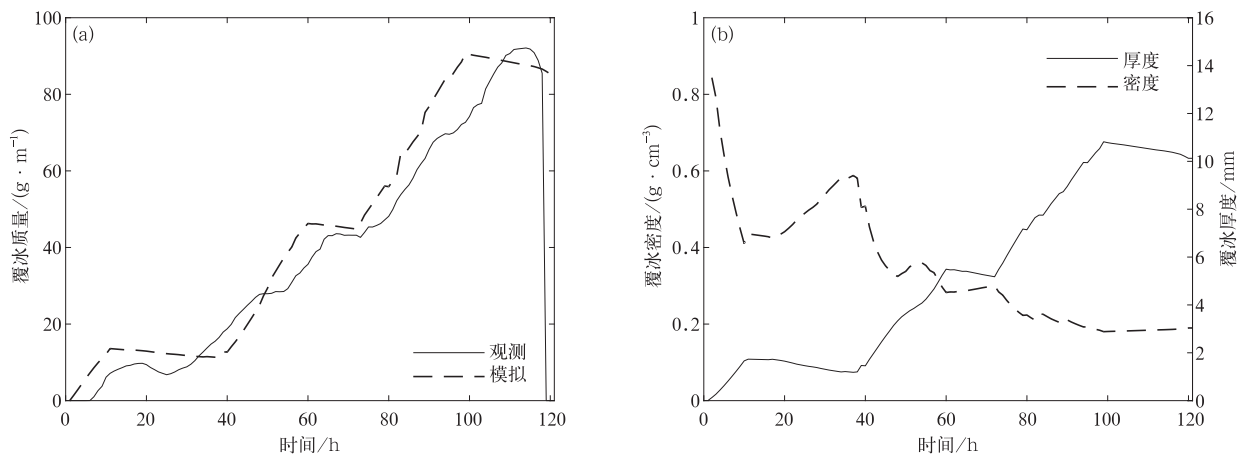


图4 2011年1月27日—2月1日威宁站典型覆冰过程模拟

(a)覆冰质量,(b)覆冰密度和覆冰厚度

Fig. 4 Modeling of a wire icing process at Weining from 27 Jan to 1 Feb in 2011

(a)ice weight,(b)ice density and ice thickness

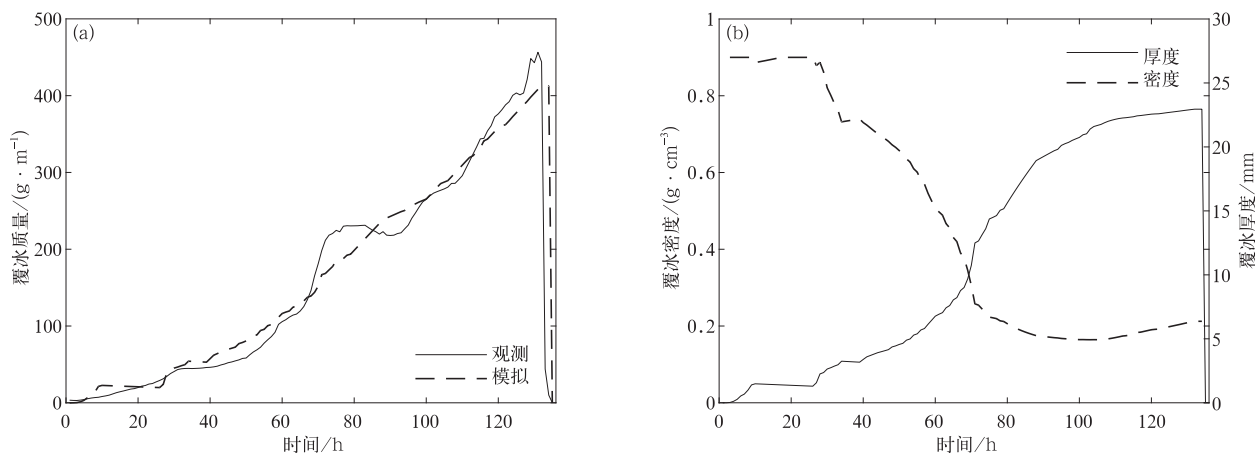


图5 2011年12月21—26日梅花山野外站典型覆冰过程模拟

(a)覆冰质量,(b)覆冰密度和覆冰厚度

Fig. 5 Modeling of a wire icing process at Meihuashan from 21 Dec to 26 Dec in 2011

(a)ice weight,(b)ice density and ice thickness

小于 $0.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 与该次覆冰过程性质为雾凇覆冰也是一致的。

图6为在万山站($27^{\circ}31' \text{N}$, $109^{\circ}12' \text{E}$, 海拔为884 m)观测到的一次超长时间覆冰过程的模拟结果, 整个过程从2012年1月14日14:00—1月25日14:00, 共持续264 h。由图6可见, 其间包括两次几乎连贯的覆冰过程, 第1次覆冰过程为持续时间较短的雨凇覆冰过程, 在开始阶段20 h内由于降雨导致覆冰迅速增长, 进入维持减弱阶段, 80 h后由于环境气温上升到 0°C 以上使覆冰迅速消融; 其

后40 h由于环境气温在 0°C 附近波动使覆冰不明显, 覆冰过程出现中断。第2次覆冰过程主要是雾凇覆冰, 由于温度持续下降并出现浓雾导致覆冰出现快速增长, 覆冰质量在50 h内迅速增长至 $200 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 而后浓雾消散使覆冰进入维持减弱阶段, 之后短暂出现的浓雾使覆冰又有所增长。环境气温稳定在 0°C 以上, 覆冰迅速消融。图6a中可见模拟结果较好地描述了整个覆冰过程, 包括覆冰质量的增长和起伏变化, 而图6b中覆冰密度的模拟结果也正确反映了覆冰性质的变化。

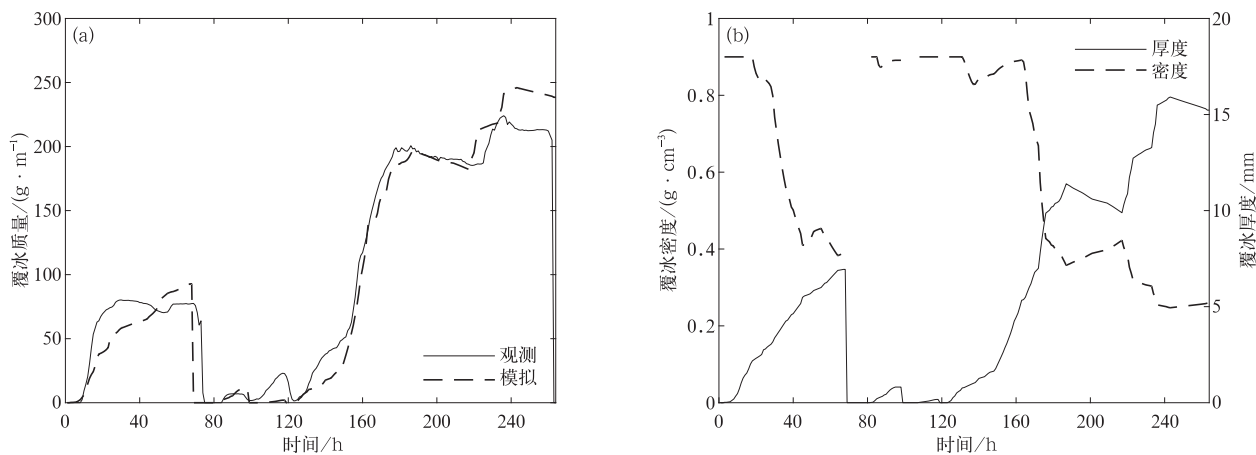


图6 2012年1月14—25日万山站典型覆冰过程模拟

(a)覆冰质量,(b)覆冰密度和覆冰厚度

Fig. 6 Modeling of a wire icing process at Wanshan from 14 Jan to 25 Jan in 2012

(a)ice weight,(b)ice density and ice thickness

3.2 误差分析

根据气象条件对覆冰过程进行正确判别并对模式算法进行合理控制,这是模式成功模拟的关键。模式模拟结果的误差主要源于两个方面:模式本身的计算误差及模式输入场(观测资料)误差。由于空气中雾滴直径缺乏实时观测资料,本文使用历史平均值代替导致了一定误差,而雾中液态含水量的计算也有一定的误差。大气液态含水量为非常规观测项目,在缺乏实时观测资料的情况下如何通过常规气象资料准确计算大气液态含水量是比较困难的问题,模式中虽然提出了相应的计算方案,但该方案还需要通过进一步的观测试验进行完善。另外,在贵州的观测试验发现覆冰期间出现较大降雨量的冻雨并不多见,更多的是降雨量很小的冻毛雨,其液滴直径小于 $400 \mu\text{m}$,在没有雨滴谱观测资料的情况下如何正确判断并适当取值也是有待进一步研究的问题。模式输入的气象观测资料误差主要源于自动气象站的观测误差^[32],雨量计和风速仪可能在覆冰情况下冻结导致降雨量和风速缺测,采用称重式雨量计和超声风速仪可以解决这一问题^[33]。需要指出的是,降水相态(固态或液态)对于覆冰具有重要影响,降雪等固态降水并不能造成覆冰的明显增长,因此,仅有降水量观测是不够的,模式应用时需对降水相态进行区分。如果有详细的雨雾微物理特征量观测资料,模式应用效果将有所提高。

4 小 结

本文利用在贵州开展导线覆冰自动观测试验获取的覆冰过程观测资料,将覆冰理论模型应用与覆冰过程气象条件判别相结合,初步建立了基于过程判别的雨雾凇导线覆冰气象模式,并应用该模式对观测试验期间获取的多个导线覆冰过程进行数值模拟,得到以下主要结论:

1) 该模式建立在较为完备的覆冰理论基础上,结合覆冰过程气象条件判别指标并考虑了覆冰因挥发或蒸发导致的质量损失,不仅能够模拟覆冰的增长,且能够模拟覆冰的维持、减弱、消融全过程。

2) 该模式主要以常规气象要素为模式输入场,能够输出全过程逐小时覆冰质量、覆冰厚度及覆冰密度变化模拟结果。

3) 应用该模式进行模拟试验取得了较为理想的效果,模拟实际覆冰过程覆冰质量变化的最大相对误差小于 20%,具有较大的应用价值。

考虑到覆冰变化的局地性很强而气象站分布较为稀疏,且缺乏雨雾微物理特征量观测资料,若模式输入场采用高分辨率的数值天气预报产品,则模式可应用于大范围输电线路覆冰模拟和预报。

参 考 文 献

- [1] Lozowski E P, Stallabrass J R, Hearty P F. The icing of an un-

- heated, nonrotating cylinder. Part I. A simulation model. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22: 2053-2062.
- [2] Makkonen L. Modling of ice accretion on wires. *Climate J App Meteor*, 1984, 23(6): 929-939.
- [3] Jones K F. A Sample model for freezing rain ice loads. *Atmos Res*, 1998, 46: 87-97.
- [4] 谭冠日. 电线积冰若干小气候特征的探讨. *气象学报*, 1982, 40(1): 13-23.
- [5] 蒋兴良, 孙才新. 三峡地区导线覆冰的特性及雾凇覆冰模型. *重庆大学学报*, 1998, 21(2): 16-19.
- [6] 刘和云, 周迪, 付俊萍, 等. 导线雨淞覆冰预测简单模型的研究. *中国电机工程学报*, 2001, 21(4): 44-47.
- [7] 孙才新, 蒋兴良, 熊启新, 等. 导线覆冰及其干湿增长临界条件分析. *中国电机工程学报*, 2003, 23(3): 141-145.
- [8] 林锐, 陈允清, 蒋兴良. 基于碰撞特性的导线雾凇覆冰厚度预测模型研究. *高压电器*, 2010, 46(11): 43-49.
- [9] 刘春城, 刘佼. 输电线路导线覆冰机理及雨淞覆冰模型. *高电压技术*, 2011, 37(1): 241-248.
- [10] 牛生杰, 周悦, 贾然, 等. 电线积冰微物理机制初步研究: 观测和模拟. *中国科学(地球科学)*, 2011, 41(12): 1812-1821.
- [11] 吴息, 孙朋杰, 熊海星, 等. 利用常规气象资料建立的导线覆冰模型. *大气科学学报*, 2012, 35(3): 335-341.
- [12] 邓芳萍, 康丽莉, 姜瑜君, 等. 基于常规气象资料的小时标准冰厚模型及验证. *应用气象学报*, 2017, 28(2): 142-156.
- [13] 吴素良, 蔡新玲, 何晓媛, 等. 陕西省电线积冰特征. *应用气象学报*, 2009, 20(2): 247-251.
- [14] 殷水清, 赵珊珊, 王遵娅, 等. 全国电线结冰厚度分布及等级预报模型. *应用气象学报*, 2009, 20(6): 722-728.
- [15] 温华洋, 田红, 唐为安, 等. 安徽省电线积冰标准冰厚的气象估算模型. *应用气象学报*, 2011, 22(6): 747-752.
- [16] 中国气象局. 地面气象观测规范第15部分: 电线积冰观测. 北京: 气象出版社, 2007.
- [17] 郑利兵, 陈林, 林云生, 等. 基于气象观测规范的导线覆冰重量自动监测系统研究. *气象*, 2010, 36(10): 97-101.
- [18] 陈百炼, 胡欣欣, 陈林, 等. 导线覆冰自动观测试验与覆冰过程分析. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 129-139.
- [19] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [20] Masoud F. 电网的大气覆冰. 黄新波, 译. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [21] Finstad K J, Lozowski E P, Gates E M. A computational investigation of waterdroplet trajectories. *J Atmos Oceanic Technol*, 1988, 5: 160-170.
- [22] Finstad K J, Lozowski E P, Makkonen L. On the median volume diameter approximation for droplet collision efficiency. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 4008-4012.
- [23] Makkonen L. The Origin of Spongy Ice // Proc 10th IAHR Symposium on Ice. 1990: 1022-1030.
- [24] Best A C. The size distribution of raindrops. *Quart J R Met Soc*, 1949, 75: 16-36.
- [25] 吴息, 孙朋杰, 刘渝, 等. 基于雾条件下能见度估算的导线覆冰气象模型. *应用气象学报*, 2012, 23(6): 755-762.
- [26] 江祖凡. 云中含水量与温度. *气象*, 1985, 11(2): 30-30.
- [27] 文继芬. 雨雾天气的滴谱、含水量与积冰. *贵州气象*, 1994, 18(6): 21-26.
- [28] 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 导线积冰的云雾特征观测研究. *应用气象学报*, 2008, 19(1): 91-95.
- [29] Macklin W C. The density and structure of ice formed by accretion. *Q J R Met Soc*, 1962, 88: 30-50.
- [30] Bain M, Gayet J F. Contribution to the modelling of the ice accretion process-ice density variation with the impacted surface angle. *Ann Glaciol*, 1983, 4: 19-23.
- [31] 纪威, 杨萱. 湿空气热力参数的计算方程. *暖通空调*, 1996(3): 16-19.
- [32] 王颖, 刘小宁, 鞠晓慧, 等. 自动观测与人工观测差异的初步分析. *应用气象学报*, 2007, 18(6): 849-855.
- [33] 李林, 范雪波, 崔炜, 等. 称重与人工观测降水量的差异. *应用气象学报*, 2015, 26(6): 688-694.

Meteorological Model of Wire Icing Caused by Rime and Glaze Based on the Process Judgment

Chen Bailian¹⁾ Hu Xinxin¹⁾ Wu Xi²⁾ Cheng Zhigang³⁾

¹⁾ (Guizhou Institute of Climate in Mountainous Environment Areas, Guiyang 550002)

²⁾ (Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

³⁾ (Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

Abstract

Due to lack of detail observations of wire icing processes under natural environment, evolution characteristics of wire icing processes isn't very clear and the modeling is difficult. To solve this problem, under the support of the National Research Funds for Public Welfare, a special equipment for automatic monitoring the mass of ice accretion on wires is successfully trial-manufactured and employed in field observation experiments carried out in Guizhou. During the field observation experiments from January 2011 to March 2013, plenty of detail observations of wire icing process are obtained, including minutely evolution of ice mass and relative meteorological elements, which provide conditions for subsequent research. Using the experiment data, evolution characteristics of wire icing processes and relative meteorological conditions are investigated. Results show that there are five different evolution phases in the whole icing process, including beginning, growth, persistence, fading and dispelling of the ice-coat, and the judgment criteria of meteorological conditions are found out. A numerical model describing wire icing processes caused by rime and glaze is developed and applied to simulate observed wire icing processes.

Based on the theoretical model frame for wire icing which is universally accepted, and combined with the judgment criteria of meteorological conditions, a numerical model of wire icing caused by rime and glaze based on the process judgment is presented. The model adopts improved parameterization schemes and algorithms, including respective procedures for rime and glaze icing, and takes the mass loss due to sublimation and surface evaporation into account. With the in-situ meteorological data combined with the judgment criteria of meteorological conditions, the numerical model is validated by applying to simulate observed wire icing processes. Modeling results show it is able to describe correctly the whole icing process, including growth, persistence, fading and dispelling of the ice-coat, with the maximum difference of ice-coat quality between modeling and observation less than 20%. Modeling errors come from two aspects, including calculation errors of the model itself and errors of meteorological data input. The icing model with common meteorological elements input can be used to calculate and hourly variation of mass, thickness and density of the ice-coat, and is of practical value for application. Under the condition of inputting with microphysics observations of real weather processes, the modeling result can be further improved. Furthermore, taking advantage of products from a refined local numerical weather forecast model, this icing model can be applied in predicting the evolution of the ice accretion on the real power transmission lines, and has wide application prospect.

Key words: wire icing; process judgment; meteorological model; numerical modeling